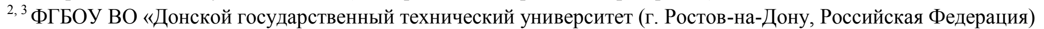
МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 631.31:681.2.083:631.421 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-5-14



Исследование и моделирование многослойного композитного материала с применением базальтовой ткани



А. Карнуб[1], Д. Б. Нежижимов[2], К. С. Ширинян[3]
[1] Федеральный институт технологии (г. Цюрих, Швейцарская Конфедерация)
[2, 3] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Введение. Композитные материалы (КМ) все шире используются в различных сферах: машиностроении (в том числе в производстве судов, авиа- и сельскохозяйственной техники), приборостроении, изготовлении емкостей высокого давления и т. д. Довольно часто применяются многослойные композиты, состоящие в основном из одного вида армирующего материала и связующего. Особый интерес представляет использование в одном композите различных видов армирующих материалов — более прочных в местах наибольших напряжений в сечении. В качестве примера можно привести многослойный КМ из стеклянных и базальтовых тканей и волокон с одним видом связующего. Цель исследования — оценить свойства такого материала и смоделировать его методом конечных элементов.
Материалы и методы. В работе использованы компоненты, доступные в свободной продаже. Армирующие материалы — базальтовая ткань БТ-11, стеклоткань ТР-0,5, а также стекломат плотностью 300 г/м^2. Связующее — смола эпоксидная ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамином. Для испытаний на растяжение и изгиб были изготовлены два материала, которые отличались по количеству, виду и последовательности слоев. Для моделирования использовалась система автоматизированного проектирования «Компас 3D» (модуль APM-FEM).
Результаты исследования. В наружных слоях композитного материала используется базальтовая ткань, во внутренних — стеклоткань. Такой подход позволяет повысить предел прочности композита при работе на растяжение и изгиб, однако критическое разрушение ведет к мгновенной потере несущей способности материала. Если же стекломат применяется в качестве сердцевины, то допустимое напряжение ниже (и на разрыв, и на изгиб). Однако при изгибе расслоение материала сокращает его несущую способность до 10% от максимальной. Моделирование материала предполагает некоторые допущения, которые связаны с размером конечных элементов.
Обсуждение и заключения. Применение базальтовых тканей в качестве армирующего вещества позволяет получать изделия со свойствами как стекло-, так и углепластиков. Такой КМ будет незначительно дороже стеклопластика и намного дешевле углепластика. Изделия из композитных материалов (приравненных к изотропным материалам) можно моделировать в системах автоматизированного проектирования методом конечных элементов. Важно учитывать вид нагружения на изделие, поскольку КМ, в основном, обладают анизотропными свойствами (нагрузка прикладывается с учетом направления волокон). В многослойных КМ из конструкционных тканей необходимо направлять нагрузки вдоль волокон. Кроме того, нужно учитывать межслойный сдвиг, различную адгезию между слоями и т. д. Главное допущение данного метода — «постоянство» толщины материала, количества слоев и порядка их расположения.

Ключевые слова: композитный материал, базальтовая ткань, стеклоткань, стекломат, напряжения, метод конечных элементов.

Для цитирования: Карнуб, А. Исследование и моделирование многослойного композитного материала с применением базальтовой ткани / А. Карнуб, Д. Б. Нежижимов, К. С. Ширинян // Вестник Донского государственного технического университета. — 2020. — Т. 20, № 1. — С. 6–15. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-5-14



Research and modeling of a multilayer composite material using basalt fabric

A. Karnoub[1], D. B. Nezhizhimov[2], K. S. Shirinyan[3]
[1] ETH (Zurich, Switzerland)
[2, 3] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Introduction. The range of use of composite materials (CM) is constantly expanding, finding application in many areas of mechanical engineering, agricultural technology, aircraft manufacturing, instrumentation, shipbuilding, in the manufacture of high-pressure containers, etc. Quite often, multilayer composites consisting mainly of one type of reinforcing material and a binder are used. Of particular interest is the use of various types of reinforcing materials – more durable in the places of maximum stress in the cross section – in a single composite. As an example, we can use glass and basalt fabrics and fibers using one type of binder. The work objective is to study properties of such a material and to model it using the finite element method.
Materials and Methods. The components used are commercially available. BT-11 basalt fabric, TR-0.5 fiberglass, as well as glass mat with a density of 300 g/m^2 were used as reinforcing materials. An epoxy resin of the ED-20 grade with a PEPA hardener was used as a binder. Two types of material were also manufactured for tensile and bending tests, respectively, the differences of which consisted in the number, type and layer sequence. For modeling, CAD COMPASS 3D, APM-FEM module was used.
Results. Basalt fabric is used in the outer layers of the composite material, fiberglass – in the inner layers. This approach provides increasing the tensile strength of the composite during tensile and bending; however, critical failure leads to an instant loss of the bearing capacity of the material. The use of glass mat as the core of the composite material showed lower allowable stresses, both tensile and bending; but in case of bending, it turned out that when the material was delaminated, the load-bearing capacity of the material was about 10% of the maximum. Modeling of the material is possible with some assumptions, in view of the size of the final elements.
Discussion and Conclusions. The use of basalt fabrics as a reinforcing material provides obtaining products with the properties of both glass and carbon plastics. Such a CM will be slightly more expensive than fiberglass and much cheaper than carbon fiber. Products made of composite materials (equivalent to isotropic materials) can be modeled in computer-aided design systems using the finite element method. It is important to consider the type of loading on the product, since CM mainly have anisotropic properties (the load is applied taking into account the direction of fibers). In multilayer CM from structural fabrics, it is necessary to direct the loads along the fibers. In addition, it is necessary to consider the interlayer shear, different adhesion between the layers, etc. The main assumption of this method is the "constancy" of the material thickness, the number of layers and the order of their location.

Keywords: composite material, basalt fabric, fiberglass, glass mat, finite element method.

For citation: A. Karnoub, D. B. Nezhizhimov, K. S. Shirinyan. Research and modeling of a multilayer composite material using basalt fabric. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 5–14. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-5-14

Введение. В работе изучены и смоделированы полимерные композитные материалы (КМ) с армирующим составом на основе базальтовых и стеклянных тканей. В качестве связующего использовалась эпоксидная смола. Исследовались 11- и 13-слойные композиты.

В [1] отмечены технологические и иные особенности КМ, в том числе определяющие распределение нагрузки в слоях. Здесь же рассмотрен принцип «простого» моделирования композитного материала в различных системах автоматизированного проектирования (САПР), а также описано поведение КМ в зависимости от вида нагружения.

Описан метод увеличения сопротивления межслойному сдвигу в полимерных КМ за счет добавления в связующее мелкодисперсных твердых частиц (например, стекла)[1]. Исследован процесс возникновения межслойных напряжений [2]. Вполне возможно, что применение этого способа позволило бы избежать расслоения и повысить допустимые напряжения образцов.

В [3–5] определены объемное содержание связующего, способы его нанесения на армирующий материал, метод укладки, порядок операций и т. д.

[1] Нежижимов Д. Б. Способ увеличения сопротивления межслойному сдвигу в многослойных композитных материалах // Молодежь и наука: шаг к успеху : сб. ст. 3-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. Курск, 2019. С. 84–88.

Известно, что вид деформации и разрушения композитного полимера определяется его формой, качеством и связующим (в том числе его объемным содержанием)[1]. Выведена соответствующая зависимость [6, 7].

В [8–10] описано моделирование детали из КМ с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в САПР.

В представленной работе также использован МКЭ. С его помощью:

— проверена достоверность определения напряжений в местах разрушения образцов и коэффициентов запаса прочности,

— выявлены особенности использования допущений, облегчающих расчет изделий из полимерных КМ, испытанных ранее на разрывных машинах.

В [11] описано влияние формы, вида и типа армирующих компонентов на термические и механические свойства полимерного композиционного материала.

В [12, 13] отмечены возможности применения композитов в машиностроении, автомобилестроении, строительстве и т. д.

Цели исследования:

— обосновать применение базальтовых тканей в полимерных КМ,

— определить их прочностные свойства при различных армирующих компонентах,

— проверить возможности моделирования КМ методом конечных элементов.

Материалы и методы

В работе изучен композитный материал на основе базальтовой и стеклянной ткани и стекломата. В качестве связующего использована эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамином (ПЭПА). Армирующие вещества: стеклоткань ТР-0,5, базальтовая ткань БТ-11 и стекломат плотностью 300 г/м^2. Особенностью эксперимента было применение сразу нескольких видов армирующего материала в одном композите.

Обоснование использования базальтовой ткани и моделирования методом конечных элементов. В настоящее время в КМ редко используется базальтовая ткань, хотя она обладает характеристиками, важными для качественных композитов: высокая ударная вязкость, высокая удельная прочность, жаропрочность, экологическая чистота, высокая стойкость к коррозии и воздействию кислот, низкая теплопроводность, доступная цена, радиопрозрачность и хорошие звукопоглощающие свойства. Также стоит отметить, что базальт — это горная порода, и его запасы практически не ограничены. При производстве базальтового волокна горная порода расплавляется, из нее вытягиваются нити, которые используются для изготовления ткани, ровинга и т. д. По прочности базальтовое волокно превосходит стекловолокно и приближается к углеволокну. Цена базальтового волокна немного выше стекловолокна, однако значительно ниже углеволокна. Это позволяет производить изделия более высокого качества, чем стекловолоконные, но при этом дешевле, чем из углеволокна. Особый интерес представляет использование в одном КМ нескольких армирующих материалов: стекло- и базальтовой ткани, а также стекломата.

При моделировании композитов в САПР необходимо задавать материалам различные характеристики, что создает известные сложности. В рамках данной работы определяется возможность стандартного исследования конструкций методом конечных элементов. Для этого анизотропный материал «приравнивают» к изотропному, и изделия проектируются таким образом, чтобы можно было приложить нагрузки вдоль направления волокон.

Использование конструкционных тканей позволяет с некоторым допущением моделировать поведение КМ. Однако необходимо учитывать вид плетения тканей и угол поворота между слоями. Таким образом, следует получить результаты эксперимента по определению прочностных свойств и выяснить предел прочности при растяжении и изгибе. С учетом этой информации можно смоделировать композит на данные виды нагружения, поскольку материал продолжает разрушаться после повреждения наружного слоя при изгибе и дефектного слоя при растяжении. Если при растяжении в композите нет дефектов, разрушение в основном происходит в опасном сечении.

Подготовка к эксперименту. Для проведения эксперимента были изготовлены образцы из композитного материала (рис. 1).

[1] Антибас И. Р., Дьяченко А. Г. Исследование процесса разрушения слоистого композитного материала // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». Ростов н/Д, 2017. С. 179–181.




а)




б)

Рис. 1. Образцы для испытаний: на изгиб (*а*); на растяжение (*б*)

В первом случае (рис. 1 *а*):

— тип укладки — сэндвич (симметричное расположение слоев во всех образцах),
— указывается общее количество слоев на один образец (сначала наружный, затем средний, затем внутренний),
— 4 слоя базальтовой ткани (БТ),
— 2 слоя стеклоткани (СТ),
— 7 слоев стекломата (СМ).

Во втором случае (рис. 1 *б*):

— 6 слоев базальтовой ткани (БТ),
— 5 слоев стеклоткани (СТ).

В обоих случаях связующее — смола ЭД-20, отвердитель — ПЭПА.

Таким образом, получены два вида материала. Их различия позволяют проверить:

— есть ли смысл использовать ткани вместе с матами,
— какие эффекты даст сочетание различных видов материалов.

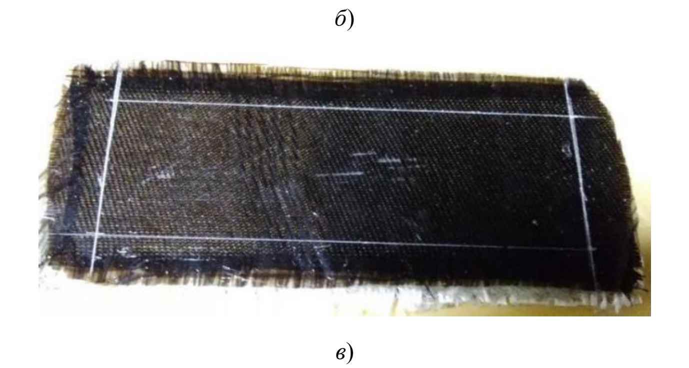
Изготовление образцов. Образцы изготавливались последовательной укладкой слоев тканей (рис. 2 *а*) на основание, обтянутое пленкой, т. к. между смолой и пленками нет адгезии.



а)



б)



в)

Рис. 2. Изготовление образцов: вырезка материала (*а*), удаление излишков смолы (*б*), механическая обработка (*в*)

После укладки всех слоев их нагревали и одновременно разглаживали шпателем через пленку (рис. 2 *б*) — так получилась ровная поверхность без излишков смолы. Схема изготовления:

1) вырезание образцов с запасом на мехобработку,
2) подготовка основания,
3) активация смолы,
4) укладка слоев,
5) разглаживание,
6) фиксация,
7) отверждение,
8) мехобработка (рис. 2 *в*).

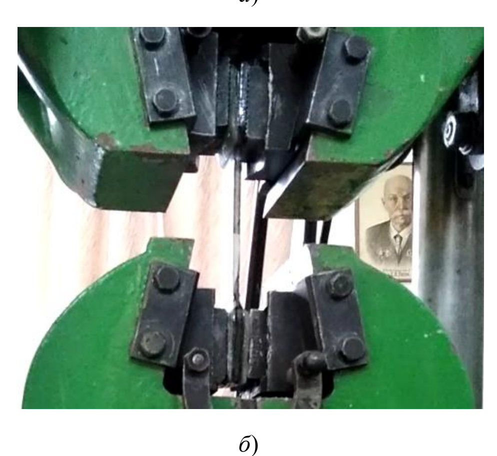
Испытания на растяжение и изгиб. Испытания на растяжение и изгиб производились на разрывной машине (рис. 3–5).



Рис. 3. Разрывная машина




а)



б)

Рис. 4. Испытания: на изгиб (*а*); на разрыв (*б*)



а)




б)

Рис. 5. Результаты разрушения образцов: на растяжение (*а*), на изгиб (*б*)

Результаты исследования

Выводы по испытаниям. По итогам испытаний можно сделать следующий вывод: при сочетании тканей и матов характерной особенностью разрушения является расслаивание на границе различных видов материала (рис. 5). Если же речь идет только о слоях ткани, такой явной особенности не наблюдается. Используемые в качестве армирующего вещества ткани рвутся в месте максимальных напряжений, а затем резко разрушаются. Первоначально разрушаются отдельные волокна, что сопровождается характерным звуком. Затем волокна вытягиваются из матрицы — и разрушается сама матрица. Об этом свидетельствует изменение цвета — место разрушения «белеет» и выглядит более матовым. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

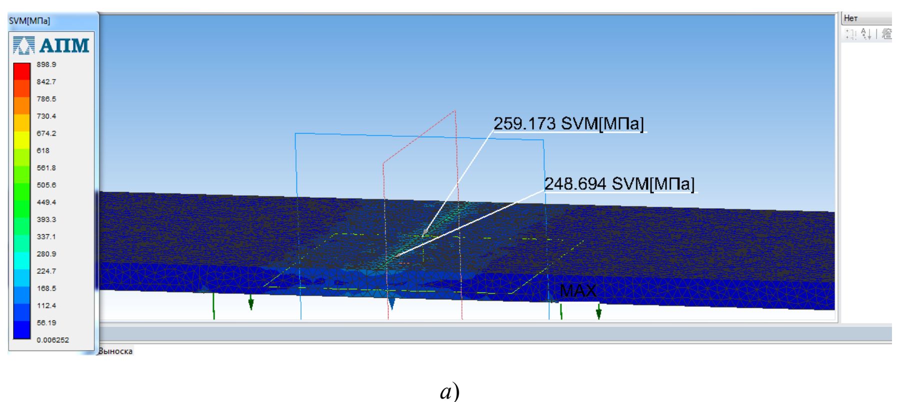
Таблица 1

Характеристики композитных материалов, исследованных на изгиб и разрыв

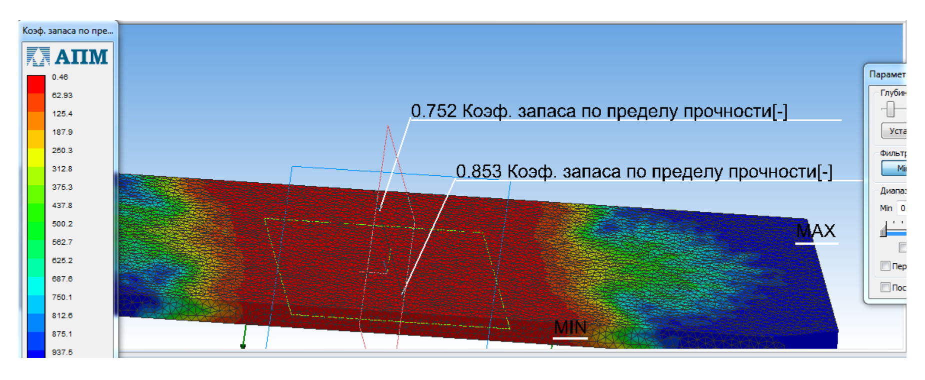
	6БТ5СТ/ЭД-20	4БТ2СТ7СМ/ЭД-20
Макс. усилие при изгибе, кг	500	965
Макс. усилие при разрыве, кг	3560	2600
Макс. напряжение при изгибе, МПа	265,1	239,5
Макс. напряжение при разрыве, МПа	191,8	120
Параметры образца и расстояние между опорами при изгибе, мм*	$b = 64,2$; $h = 5,5$; $L = 70$	$b = 61,7$; $h = 8,2$; $L = 70$
Размеры сечения при разрыве, мм	$b = 35$; $h = 5,2$	$b = 29,5$; $h = 7,2$
Плотность, кг/м^3	650	700
*Здесь b — средняя ширина образца, h — средняя толщина образца, L — расстояние между опорами.		

Моделирование композитных материалов и проверка испытаний. Для моделирования выбран материал 6БТ5СТ. Его характеристики внесены в библиотеку «Компас 3D», созданы твердотельные модели. С использованием модуля APM FEM для «Компас 3D» произведены расчеты методом конечных элементов. При этом возникали трудности, обусловленные подбором оптимальных размеров конечных элементов. Для расчетов использованы следующие допущения: места закреплений и приложений нагрузок выполнялись незначительным вытягиванием «полос» шириной 0,1–0,2 мм. На данных участках не стоит учитывать результаты напряжений и коэффициентов запаса прочности, т. к. они некорректны. Такие упрощения позволяют прикладывать нагрузки и устанавливать закрепления в любых местах на моделях. Оптимальный размер сетки — от 2 до 3 мм.

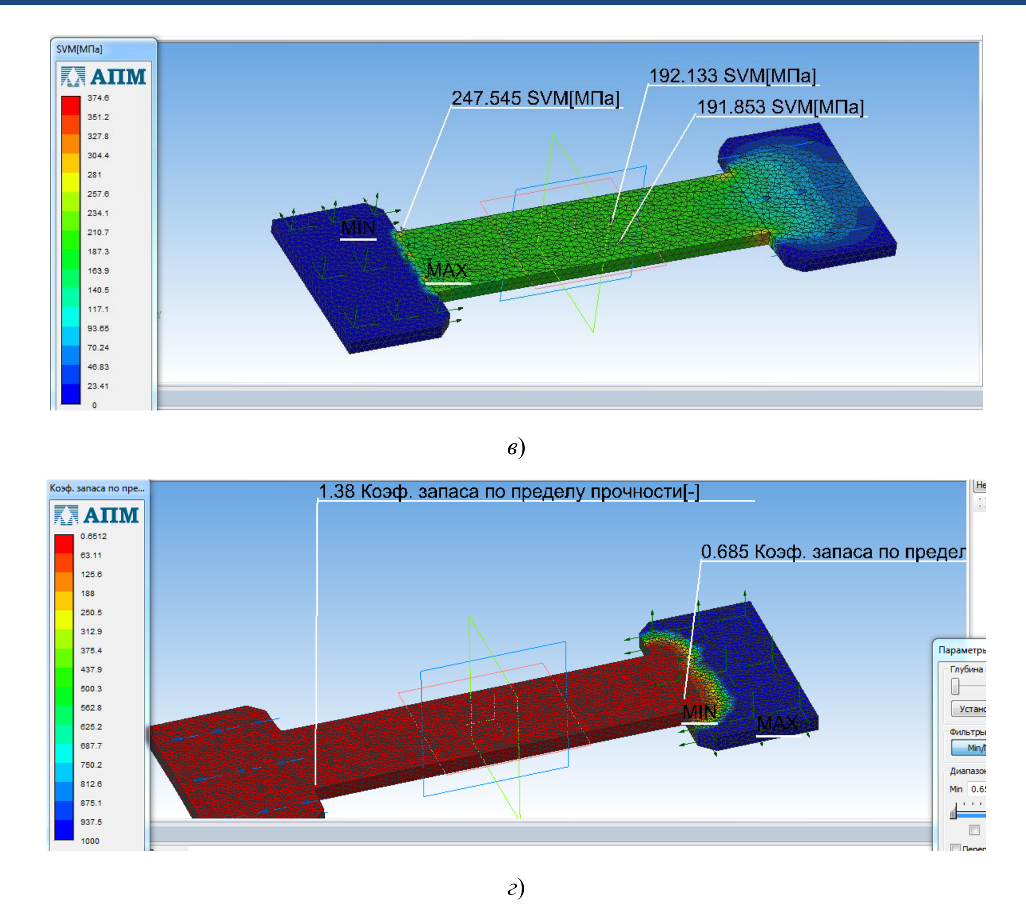
Карты результатов расчетов по напряжениям и коэффициенту запаса предела прочности представлены на рис. 6.



а)



б)



в)

г)

Рис. 6. Карты результатов: по напряжениям (*а*), (*в*); по коэффициенту запаса предела прочности (*б*), (*г*)

Результаты моделирования позволяют утверждать, что настоящие образцы разрушаются в местах, испытывающих максимальные напряжения. Из-за погрешности моделирования коэффициент запаса предела прочности не равен единице, и уменьшение размеров конечных элементов решает эту проблему. Также стоит сказать, что данный метод будет нормально реализован при моделировании конструкций, работающих на растяжение или сжатие, поскольку эти процессы сопровождаются в основном нормальными напряжениями. Однако в ходе испытаний выяснилось, что при различных коэффициентах удлинения у армирующих материалов происходит расслоение вдоль линии нагружения на границе слоев из-за недостаточной межслойной адгезии и высоких касательных напряжений.

Обсуждение и заключения. Применение базальтовых тканей в качестве армирующего вещества позволяет получать изделия со свойствами как стекло-, так и углепластиков. При этом такой КМ будет незначительно дороже стеклопластика и намного дешевле углепластика. Следует отметить хорошие показатели удельной прочности базальта, его абсолютной негорючести, высокой ударной вязкости, стойкости к УФ-излучению. Базальт является диэлектриком, поэтому может использоваться при изготовлении корпусов радиоаппаратуры.

Эксперименты показали более высокие прочностные характеристики тех КМ, в которых больше слоев базальтовой ткани и не применяется стекломат. Использование стекломата в качестве сердечника обуславливает высокие межслойные сдвиговые напряжения, что стимулирует межслойное разрушение и при растяжении, и при изгибе. Максимальные напряжения при изгибе для образца с большим количеством слоев базальтовой ткани составили 261,5 МПа (против 239 МПа с меньшим количеством слоев базальтовой ткани). Кроме того, отмечено явное превосходство по максимальным напряжениям при растяжении — 190 МПа против 120 МПа.

Результаты проведенных расчетов позволяют утверждать, что изделия из композитных материалов (приравненных к изотропным материалам) можно моделировать в САПР методом конечных элементов. Очень важно учитывать вид нагружения на изделие, поскольку КМ, в основном, обладают анизотропными свойствами (нагрузка прикладывается с учетом направления волокон). Так, в многослойных КМ из конструкционных тканей необходимо направлять нагрузки вдоль волокон. Кроме того, нужно учитывать межслойный сдвиг, различную адгезию между слоями и т. д. Главным допущением данного метода является «постоянство» толщины данного материала, количества слоев и порядка их расположения.

Полученные данные и метод нуждаются в дальнейшем исследовании, что позволит создать сортамент композитных материалов с известными характеристиками, моделировать их и выполнять соответствующие расчеты.

Библиографический список

1. Нежижимов, Д. Б. Особенности изделий из композитных материалов / Д. Б. Нежижимов // Актуальные проблемы науки и техники. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2019. — С. 376–377.

2. Антибас, И. Р. Влияние формы гофрированного картона на амортизирующие свойства упаковки / И. Р. Антибас, С. А. Партко, А. Н. Сиротенко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 36–42.

3. Антибас, И. Р. Влияние содержания древесного дисперсного наполнителя на долговечность композиционных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 1 (88). — С. 67–74.

4. Антибас, И. Р. Определение характеристик компонентов композитных материалов, предназначенных для производства деталей сельскохозяйственной техники / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Донского государственного технического университета. — 2017. — Т. 17, № 3 (90). — С. 60–69.

5. Антибас, И. Р. Изготовление теплоизоляционного материала и изучение его теплофизических и механических свойств / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 182–183.

6. Антибас, И. Р. Эффект влажного травления композитного материала из стекловолокна и полиамида на его свойства при изгибе и ударе / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Инновационные технологии в науке и образовании (ИТНО-2017) : мат-лы V Междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону : ДГТУ-Принт, 2017. — С. 26–30. DOI: https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378

7. Kharmanda, G. Integration of reliability and optimization concepts into composite yarns / G. Kharmanda, I. R. Antypas // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 20-й Междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2017». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2017. — С. 174–176.

8. Антибас, И. Р. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. ст. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2015. — С. 232–235.

9. Антибас, И. Р. Исследование влияния добавок армирующих волокон на некоторые механические свойства перспективных композитных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко, Т. П. Савостина // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса : сб. науч. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XXII агропром. форума юга России и выставки «Интерагромаш». — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2019. — С. 240–244.

10. Антибас, И. Р. Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов / И. Р. Антибас, А. Г. Дьяченко // Вестник Мордовского университета. — 2018. — Т. 28, № 3. — С. 366–378.

11. Al-Jeebory, A. A. Effect of Percentage of Fibers Reinforcement on Thermal and Mechanical Properties for Polymeric Composite Material / A. A. Al-Jeebory, A. I. Al-Mosawi, S. A. Abdul Allah // The Iraqi Journal for mechanical and materials Engineering. — 2009, 17–18 May. — Special Issue. — P. 70–82.

12. Vincenzini, P. Advanced Inorganic Fibrous Composites V / P. Vincenzini, M. Singh // Advances in Science and Technology. — 2006. — Vol. 50. — P. 97–106.

13. Dixit, A. Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a Review / A. Dixit, H. S. Mali // Mechanics of Composite Materials. — 2013. — Vol. 49, no. 1. — P. 1–20.

Сдана в редакцию 19.12.2019
Запланирована в номер 03.02.2020

Об авторах

Карнуб Амер, приглашенный исследователь физико-технической лаборатории (отдел материалов) Федерального института технологии (8092, Швейцария, Цюрих, Рэмиштрассе, 101), кандидат технических наук, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9824-7364, amerkarnoub@gmail.com

Нежижимов Данил Борисович, магистрант кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1036-5746, nezhizhimov96@mail.ru

Ширинян Карен Самвелович, магистрант кафедры «Основы конструирования машин» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7697-6411, shirinyan.karen@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов

А. Карнуб — научное руководство, корректировка цели и задачи исследования, анализ результатов испытаний, анализ результатов расчетов, доработка текста, корректировка выводов; Д. Б. Нежижимов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, закупка материалов, создание образцов, проведение испытаний, подготовка текста, анализ испытаний и проведение расчетов, формулирование выводов; К. С. Ширинян — консультации при формировании основной концепции, консультации при постановке цели и задачи исследования, проведение испытаний, консультация при расчете.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.